

ОСОБЕННОСТИ СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ МАНТИИ АВСТРАЛИИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Л.Н. Заец

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, г. Киев, 03680, e-mail: larysa_zaiets@ukr.net

Методом тейлорового приближения решения задачи сейсмической томографии, разработанной В.С. Гейко, получена трехмерная P -скоростная модель мантии Австралии, рассмотрено ее скоростное строение, представленное как в скоростях (горизонтальные сечения), так и в невязках скорости (вертикальные сечения). Анализ трехмерной P -скоростной модели мантии Австралии показывает, что тектоническое деление Австралийского континента на три части — западную, центральную (Австралийскую платформу) и восточную (Тасманский складчато-надвиговый пояс), находит отражение в скоростном строении мантии, где она делится по всей глубине на три части. Выявлены особенности размещения месторождений полезных ископаемых, эпицентров землетрясений, связанных с неоднородностями в мантии.

Ключевые слова: мантия, скоростное строение, Австралия, сейсмическая томография.

Введение. Австралия — самый малый материк земного шара, геологическое строение которого представляет интерес для глубинного исследования. В тектоническом плане континент слагают два крупных структурных элемента — древняя Австралийская платформа, занимающая около двух третей его площади на западе и в центре, и палеозойский Тасманский складчато-надвиговый пояс на востоке. С учетом структур, выходящих на земную поверхность, континент может быть разделен на западный, центральный и восточный домены [8].

Сейсмическая томография, предоставляя дополнительную информацию, дает возможность проверить и улучшить тектонические модели, обеспечивает дополнительный и независимый источник глубинных данных. Так, на основе различных подходов и данных, используемых при построении, в работах [4–7, 9–11] рассмотрены разные сейсмическая томографические модели мантии Австралии.

Метод. Представленная томографическая модель получена методом тейлорового приближения, разработанного В.С. Гейко в Институте геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины [3]. Эта модель не зависит от референтной модели, что дает существенные преимущества в точности приближения нелинейности. В качестве исходных данных используются времена прихода первых вступлений P -волн на станции, которые опубликованы в бюллетенях ISC начиная с 1964 г. Рассматриваются землетрясения, для которых известны: 1) магнитуда $\geq 4,5$; 2) глубина гипоцентра ≥ 50 км; 3) количество станций, их регистрировавших, ≥ 300 . Схема расположения станций ISC и гипоцентров землетрясений, используемых в работе, показана на рис. 1.

Основные этапы построения модели следующие:

- создается база данных времен прихода первых вступлений P -волн на станции и строится обобщенное поле времен в формате средней точки

(рис. 2): размеры области осреднения соответствуют степени насыщения данными;

- формируется годограф общей средней точки и выполняется его численное обращение. По всей совокупности зависимостей скорость–глубина строится скоростная модель в числовом и графическом виде.

Таким образом, было построено обобщенное поле времен прихода P -волн в формате средней точки и получены годографы — сечения преломленных волн. Максимальное число сейсмических лучей, которые отвечают вертикальному сечению обобщенного поля времен (число точек годографа), составляет 51 564, а минимальное — 4875. Согласно тестированию, точность обращения годографов составляет 0,015 км/с. Разрешающая способность метода $0,5^\circ \times 0,5^\circ \times 25$ км до глубины 1000 км и $1^\circ \times 1^\circ \times 25$ км для глубин от 1000 до 2400 км. В работе [3] для анализа точности обращения, полученного методом тейлорового приближения, приведен модельный пример. На рис. 3 показано соотношение экспериментального и теоретического годографов.

Решение представляется в виде горизонтальных и вертикальных сечений: горизонтальные сечения — в изолиниях скоростей, шаг изолиний выбран исходя из точности обращения сечений — 0,025 км/с; вертикальные сечения — в изолиниях невязок скорости. Для визуализации использовалась обобщенная средняя скорость v_{aver} , которая при данных графических построениях выполняет функцию одномерной референтной скорости, принятой при представлении результатов сейсмической томографии. Невязки не носят характер поправки к заданной референтной модели и имеют вид

$$\delta = v - v_{aver}.$$

Тогда выполнение условия $\delta > 0$ соответствует повышенным скоростям, $\delta < 0$ — пониженным, $\delta = 0$ — скоростной границе перехода между об-

Рис. 3. Соотношение экспериментального и теоретического годографов-сечений для Австралии (число точек годографа – 12 971): 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

Fig. 3. Comparison of the experimental and theoretical travel-time curve (the number of points of locus – 12 971): 1 – experimental; 2 – theoretical

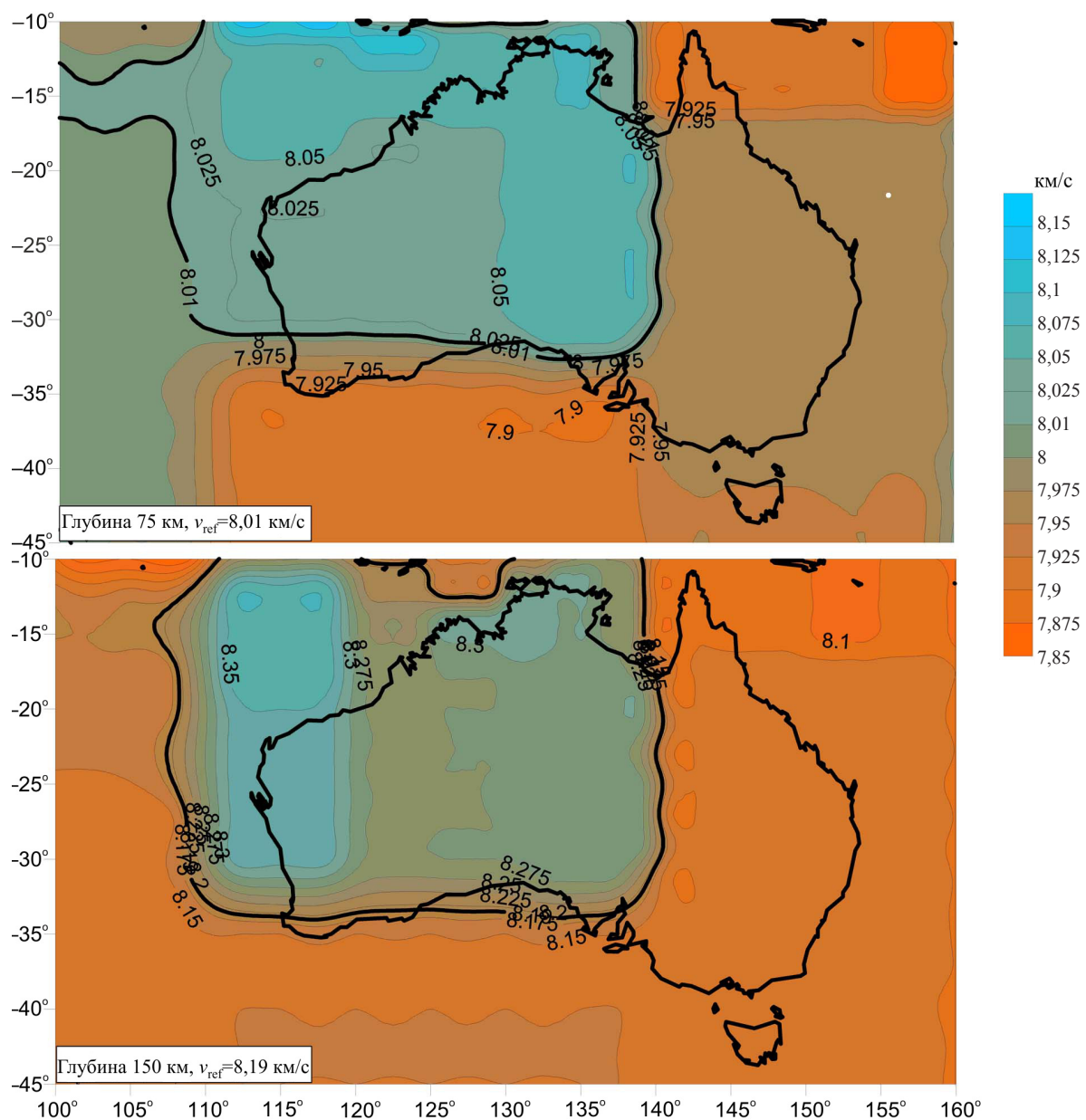
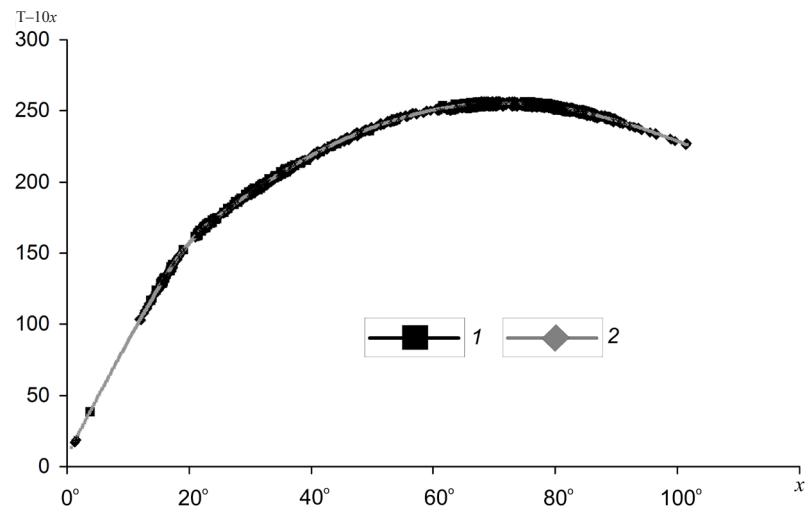


Рис. 4. Горизонтальные сечения трехмерной P -скоростной модели мантии Австралии на глубинах 75 и 150 км

Fig. 4. The horizontal cross section of the 3D P -velocity model of the mantle of the Australia (75, 150 km)

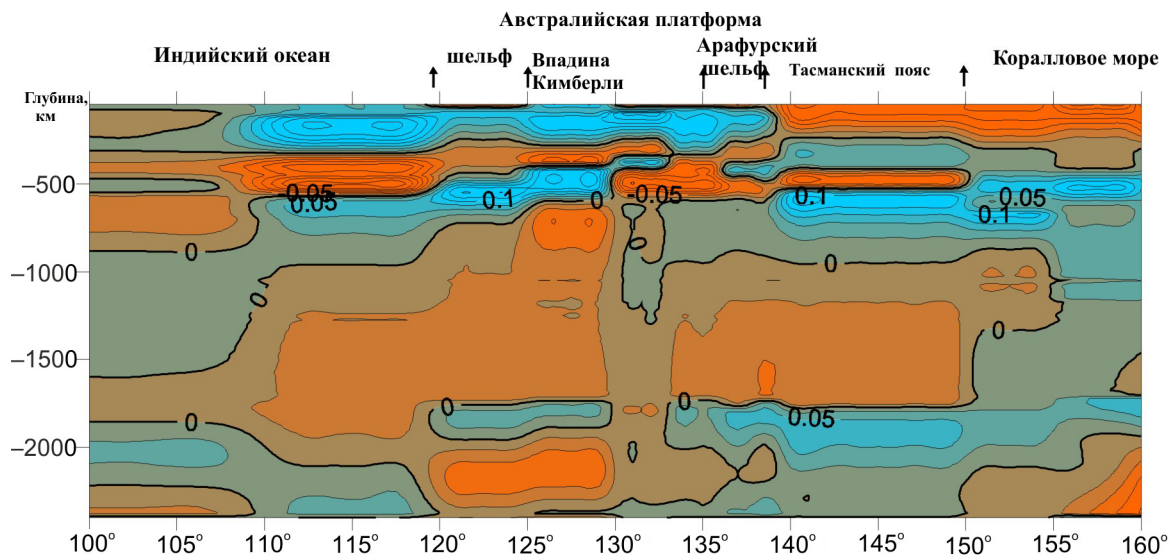


Рис. 5. Вертикальное широтное сечение 15° ю. ш. трехмерной P -скоростной модели мантии Австралии
 Fig. 5. The latitudinal cross-section of the 3D P -velocity model of the mantle of the Australia (15° SL)

ляемые в мантии на западную и центральную части по мощности высокоскоростного слоя. В западной части платформы (Западно-Австралийский щит, включающий архейские блоки Пилбара и Йилгарн) глубина залегания высокоскоростного слоя верхней мантии достигает 450 км, в то время как под центральной частью составляет 300–350 км. Переходная зона верхней мантии под Австралийской платформой низкоскоростная. Архейская ее часть (блоки Пилбара и Йилгарн) выделяется в пределах 425–650 км, центральная — 325(350)–600 км. По глубине залегания подошвы низкоскоростного слоя переходной зоны верхней мантии ее максимальное погружение наблюдается под глубоководной частью Индийского океана (до 900 км); под западной и центральной частями Австралийской платформы глубина залегания подошвы составляет 600–650 км, что характерно для стабильных структур. Под Тасманским складчато-надвиговым поясом, как более активизированной структурой, подошва выделяется на глубине 575 км.

Процесс распада Гондваны, приведший к образованию Австралии, начался с возникновения в начале юры системы континентальных рифов, обозначивших контуры будущего самостоятельного континента [2]. Анализ сейсмотомографических изображений мантии под северной окраиной континента позволил выявить характерное для рифтовых структур скоростное строение. Под окраинными блоками Кимберли, Пайн Крик и Мак Артур выделяются субвертикальные области последовательных высоко- и низкоскоростных аномалий — следствие флюидного процесса в неоднородной скоростной среде [1]. Со стороны шельфа Арафурского моря выделяется наклонный высокоскоростной слой, погружающийся в западном направлении и достигающий под Индийским океаном средней мантии (рис. 5).

Представляет интерес низкоскоростной слой, наблюдаемый со стороны Индийского океана с глубины 1600–1900 км. Он расширяется под структурами Австралийской платформы на всю нижнюю мантию, восточная его граница достигает 150° в. д. Максимальная мощность этого слоя (1800 км) выделяется под Арафурским морем. Под блоками Пайн Крик, Мак Артур, Арафурское море низкоскоростной слой раздвигается, одна его часть поднимается в верхнюю мантию, а основная распространяется субгоризонтально в средней мантии.

В пределах 18° ю. ш. — 30° ю. ш. под Австралийской платформой низкоскоростной слой нижней мантии поднимается до глубины 350 км и разделяет ее архейскую и протерозойскую части (рис. 6).

На поверхности эта область соответствует бассейнам Каннинг, Офисер и Юкла. Поднимающийся низкоскоростной слой, достигнув переходной зоны верхней мантии, растекается в восточном и западном направлениях. При этом в зонах растекания фиксируются максимальные низкоскоростные аномалии со значениями невязок до $-0,3$ км/с. Интерес вызывает тот факт, что при рассмотрении карты месторождений полезных ископаемых Австралии над областью выхода пониженных скоростей в переходную зону верхней мантии на поверхности отсутствуют месторождения полезных ископаемых. Они расположены в областях растекания пониженных скоростей.

Это же относится и к землетрясениям, которые фиксируются по области растекания пониженных скоростей в переходной зоне верхней мантии и отсутствуют над областью вертикального выхода из нижней мантии. Так, землетрясение, произошедшее в мае 2016 г. в северной части Австралии с магнитудой 6, зарегистрировано в районе, соответствующем в мантии области растекания пони-



Индийский океан

Австралийская платформа

↑ Коралловое море

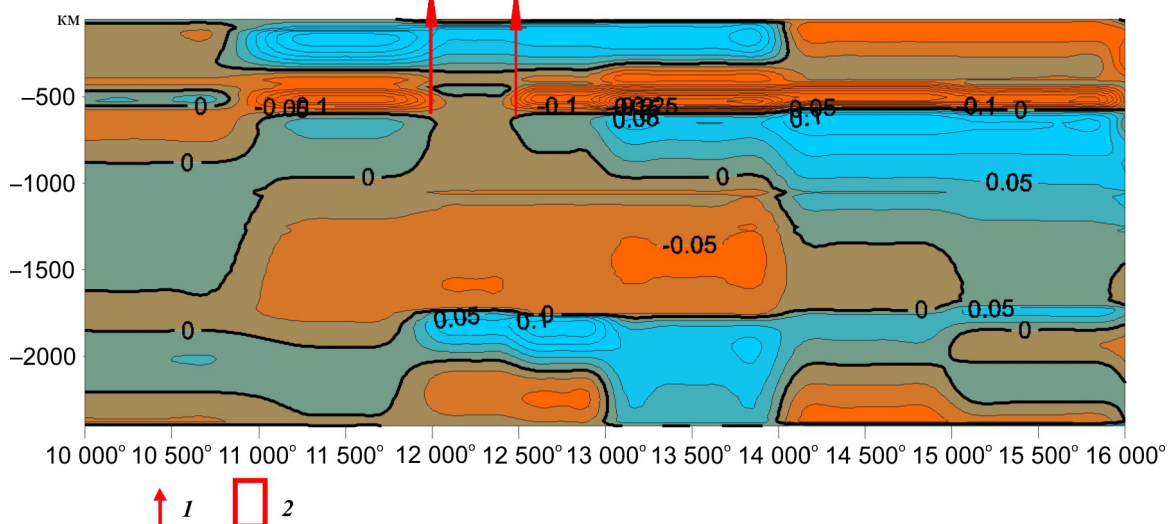


Рис. 6. Карта месторождений полезных ископаемых и вертикальное широтное сечение 20° ю. ш. трехмерной P -скоростной модели мантии Австралии: 1 – область вертикального выхода пониженных скоростей с их последующим растеканием в переходной зоне верхней мантии; 2 – область на поверхности, соответствующая в мантии вертикальному выходу пониженных скоростей с последующим растеканием в переходной зоне верхней мантии

Fig. 6. Latitudinal cross-section of the 3D P -velocity model of the mantle of the Australia (20°SL): 1 – the area of the vertical output lower velocity with their subsequent spreading in the transition zone of the upper mantle; 2 – area on the surface corresponding to the mantle of the vertical low velocity output, followed by spreading in the transition zone of the upper mantle

женных скоростей по переходной зоне мантии, и совпадает с границей аномалии с максимальной низкоскоростной невязкой $-0,3$ км/с (см. рис. 5).

Тасманский складчато-надвиговой пояс характеризуется более низкими скоростями в верхней мантии и четко выделяется до глубины 2400 км. Граница между ним и древней платформой прослеживается по подошве переходной зоны верхней мантии. В свою очередь, переходная зона верхней мантии – низкоскоростная с контрастными аномалиями под всей областью.

По поверхности невязок (рис. 7), построенной

вдоль 120° в. д., выделяется область между 10° и 30° ю. ш., где на глубинах 500–1500 км отклонение невязок от референтной средней скорости (стабильная области платформы) наименьшее. Наибольшее расслоение наблюдается между 30° и 40° ю. ш. (Индийский океан). Поскольку здесь оказывает влияние близость срединно-океанического хребта, такая расслоенность – свидетельство прохождения флюидных потоков в мантии.

Заключение. Результаты, полученные сейсмической томографией, играют важную роль в понимании крупномасштабной структуры земных недр.

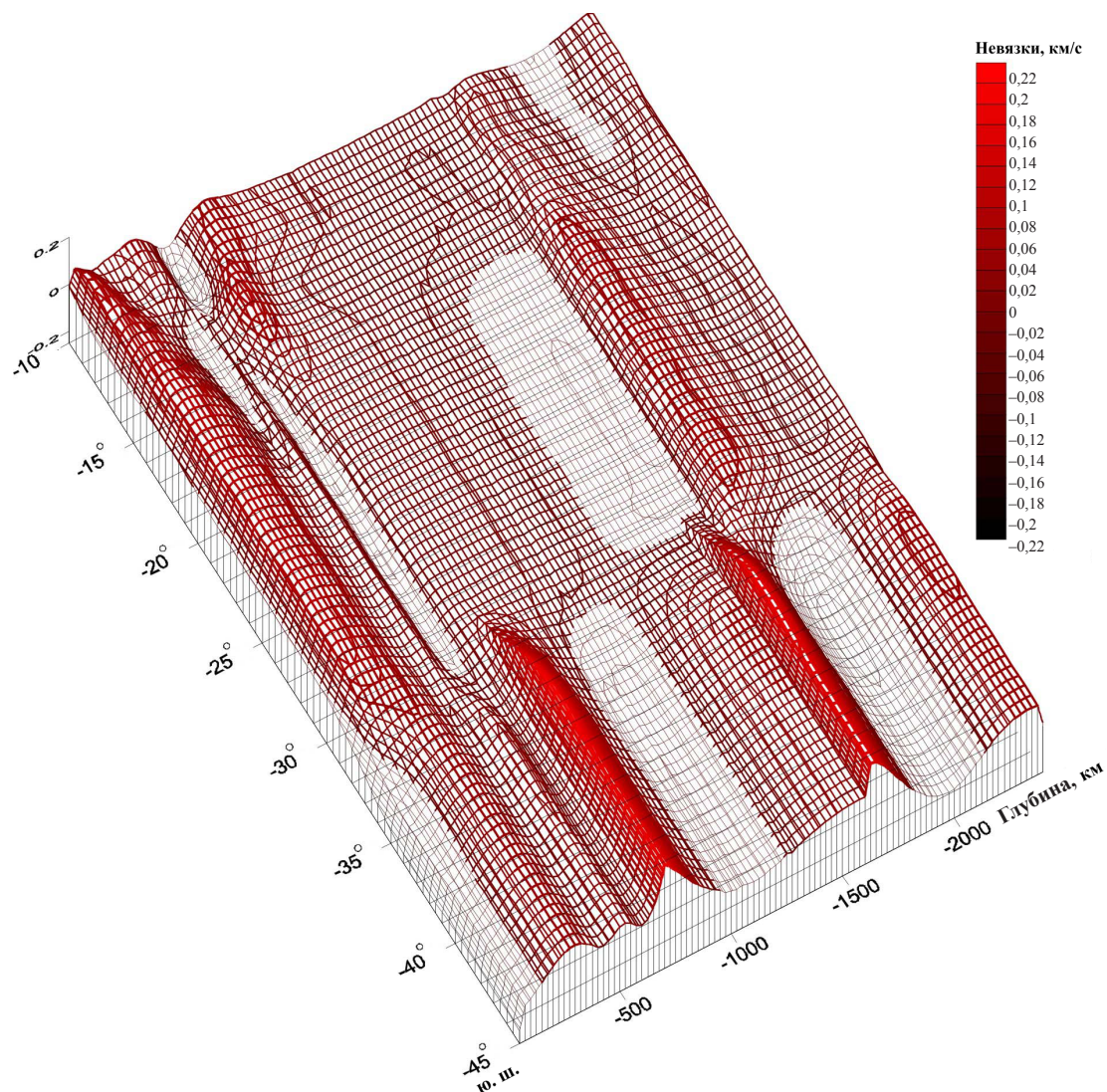


Рис. 7. Поверхность отклонения невязок скоростей по глубине вдоль 120° в. д.
Fig. 7. Surface deviation residual velocity with depth along the 120° EL

Модель, полученная по методу, предложенному В.С. Гейко, не зависит от референтной модели и дает возможность представить мантию на различных глубинах в скоростях. Проведенный анализ трехмерной P -скоростной модели мантии Австралийского континента показывает, что его тектоническое деление на три части — западную, центральную (Австралийскую платформу) и восточную (палеозойский Тасманский складчато-надвиговый пояс), отражено в скоростном строении мантии по всей глубине. Деление древней платформы на западную (Западно-Австралийский щит) и центральную части прослеживается по подошве высокоскоростного слоя верхней мантии, переходной зоне верхней мантии. Западная часть континента (приподнята на поверхности на 350–400 м над уровнем моря) имеет более мощный высокоскоростной слой верхней мантии по сравнению с центральной частью древней платформы (на поверхности опущена и перекрыта более молодыми отложениями). По скоростному строению мантии они относятся

к стабильным древним структурам, Тасманский складчатый пояс — к активизированным структурам (низкие скорости до глубины 575 км).

Согласно модели, Тасманова линия, обозначающая край протерозойского щита, не соответствует скоростной картине в мантии, что отмечается и в работе [11].

Наиболее интенсивные скоростные аномалии характерны для переходной зоны верхней мантии. В нижней мантии под областями, которые соответствуют бассейнам Каннинг, Офисер и Юкла, выделяется вертикальная область пониженных скоростей, достигающая переходной зоны верхней мантии с последующим ее растеканием на восток и запад по переходной зоне. Отмечается размещение месторождений полезных ископаемых в областях растекания пониженных скоростей и их отсутствие над самой областью вертикального распространения низкоскоростной неоднородности с нижней мантии. Это же относится и к расположению эпицентров землетрясений. В частности,

эпицентр одного из землетрясений, произошедших в Северной Австралии (май 2016 г., магнитуда 6), расположен над областью растекания пониженных скоростей. Здесь в переходной зоне верхней мантии наблюдается характерная максимальная низкоскоростная аномалия.

Список библиографических ссылок

1. Летников Ф.А. Флюидные фации континентальной среды и проблемы рудообразования. *Смирновский сборник*. М.: ВИНТИ, 1999. С. 63–95.
2. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 604 с.
3. Geyko V.S. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофизический журнал*. 2004. Т. 26, № 2. С. 3–32.
4. Hall R., Spakman W. Mantle structure and tectonic evolution of the region north and east of Australia. *Geological Society of America Special Papers*. 2003. V. 372. P. 361–381.
5. Kennett B.L.N. Seismic Structure in the Mantle beneath Australia. In: *Evolution and Dynamics of the Australian Plate. Geological Society of America Special Papers*. 2003. V. 372. P. 7–23.
6. Kennett B.L.N., Abdullah A. Seismic wave attenuation beneath the Australasian region. *Australian Journal of Earth Sciences*. 2011. V. 58, no. 3. P. 285–295.
7. Lebedev S., Nolet G. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography. *Journal of Geophysical Research*. 2003. V. 108, no. B1. P. 1–26.
8. Plumb K.A. The tectonic evolution of Australia. *Earth-Science Reviews*. 1979. V. 14, iss. 3. P. 205–249.
9. Rawlinson N., Pozgay S., Fishwick S. Seismic tomography: A window into deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2010. V. 178, iss. 3. P. 101–135.
10. Rawlinson N., Fishwick S. Seismic structure of the south-east Australian lithosphere from surface and body wave tomography. *Tectonophysics*. 2012. V. 572. P. 111–122.
11. Simons F.J., Zielhuis A., Rob D. van der Hilst. The Deep Structure of the Australian Continent from Surface-Wave Tomography. *Lithos*. 1999. V. 48. P. 17–43.

Поступила в редакцию 15.03.2017 г.

ОСОБЛИВОСТІ ШВИДКІСНОЇ БУДОВИ МАНТИЇ АВСТРАЛІЇ ЗА ДАНИМИ СЕЙСМІЧНОЇ ТОМОГРАФІЇ

Л.М. Заєць

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680,
e-mail: larysa_zaiets@ukr.net

Методом тейлорового наближення розв'язку задачі сейсмічної томографії, розробленої В.С. Гейком, отримано тривимірну Р-швидкісну модель мантиї Австралії, розглянуто її швидкісну будову, яку подано як у швидкостях (горизонтальні перетини), так і у нев'язках швидкості (вертикальні перетини). Згідно з аналізом тривимірної Р-швидкісної моделі мантиї Австралії, тектонічний розподіл континенту на три частини – західну, центральну (Австралійську платформу) і східну (Тасманський складчасто-насувний пояс), відображений у швидкісній будові мантиї, де вона розділена по всій глибині на три частини. Виявлено особливості розміщення родовищ корисних копалин, епіцентрів землетрусів, пов'язаних з неоднорідностями в мантиї.

Ключові слова: мантия, Австралія, швидкісна будова, сейсмічна томографія.

FEATURES OF THE VELOCITY STRUCTURE OF THE MANTLE OF AUSTRALIA ACCORDING TO SEISMIC TOMOGRAPHY

L.N. Zaets

Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, 32, Palladin Ave., Kiev, 03680, Ukraine,
e-mail: larysa_zaiets@ukr.net

Purpose. The aim of the paper is to analyze a three-dimensional P-velocity model of the mantle of Australia; to identify the features of the velocity distribution, their correlation with certain aspects of geotectonic as well as manifestations of seismicity.

Design/methodology/approach. The 3-D P-velocity model of the mantle of Australia has been obtained applying the method of Taylor's approximation to solve problems of P-waves arrival time seismic tomography introduced by V.S. Geyko.

Findings. The analysis of the three-dimensional P-velocity model of the mantle shows that the tectonic division of the Australian continent into three parts – the western, central (Australian plate) and the eastern (Paleozoic Tasmanian fold-thrust belt) – is seen in the velocity structure of the mantle over the entire depth (up to 2600 km). The division of the ancient part of the platform into the western (West Australian shield) and the central one is traced along the sole of the high-velocity layer of the upper mantle, the transition zone of the upper mantle. The western part of the platform has a more powerful high-velocity layer of the upper mantle in comparison with the central part of the ancient platform (on the surface it is lowered and covered by younger deposits). The velocity structure of the mantle shows them as stable, ancient structures. The eastern part – the Paleozoic Tasmanian fold-thrust belt – refers to the

activated structures (low velocity to a depth of 575 km). The most intense high-velocity anomalies are characteristic of the transition zone of the upper mantle. At the bottom of the mantle beneath the basin Canning Ofiser, Eucla, there is a vertical area of low velocity reaching the upper mantle transition zone and then spreading to the east and west along the transition zone. We have detected placing of mineral deposits in the areas of low velocity spreading and their absence over-the-domain of vertical spread with low velocity anomaly of the lower mantle. The same applies to the locations of earthquake epicenters. In particular, one of the recent earthquakes in northern Australia (in May 2016 with a magnitude of 6) is situated over the area of low velocities spreading. Here, in the upper mantle transition zone, a maximum low-velocity anomaly is characteristic of the transition zone of the upper mantle.

Practical value/implications. The analysis of the model gives new material for studying the geodynamic regime of Australia. We have shown the behavior of the velocity layers of the mantle under different tectonic structures. We have also revealed the manifestations of ultra-deep fluid processes in the mantle and their correlation with the location of earthquakes and deposits on the surface.

Keywords: mantle velocity structure, Australia, seismic tomography.

References:

1. Letnikov F.A. Flyuidnyie fatsii kontinentalnoy sredy i problemy rudoobrazovaniya. *Smirnovskiy sbornik*, Moscow, Viniti, 1999, pp. 63-95.
2. Khain V. E. Tektonika kontinentov i okeanov. Moscow, Nauchnyi mir, 2001, 604 p.
3. Geyko V.S. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskij zhurnal*, 2004, vol. 26, no. 2, pp. 3-32.
4. Hall R., Spakman W. Mantle structure and tectonic evolution of the region north and east of Australia. *Geological Society of America Special Papers*, 2003, vol. 372, pp. 361-381.
5. Kennett B.L.N. Seismic Structure in the Mantle beneath Australia, in: Evolution and Dynamics of the Australian Plate. *Geological Society of America Special Papers*, 2003, vol. 372, pp. 7-23.
6. Kennett B.L.N., Abdullah A. Seismic wave attenuation beneath the Australasian region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 285-295.
7. Lebedev S., Nolet G. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography. *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108, no. B1, pp. 1-26.
8. Plumb K.A. The tectonic evolution of Australia. *Earth-Science Reviews*, 1979, vol. 14, iss. 3, pp. 205-249.
9. Rawlinson N., Pozgay S., Fishwick S. Seismic tomography: A window into deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2010, vol.178, iss. 3, pp. 101-135.
10. Rawlinson N., Fishwick S. Seismic structure of the southeast Australian lithosphere from surface and body wave tomography. *Tectonophysics*, 2012, vol. 572, pp. 111-122.
11. Simons F.J., Zielhuis A., Rob D. van der Hilst. The Deep Structure of the Australian Continent from Surface-Wave Tomography. *Lithos*, 1999, vol. 48, pp. 17-43.

Received 15/03/2017